

钻井液侵蚀样品的数值模拟与参数影响分析

聂开文^{1,2}, 曲莉莉^{1,2}, 王元^{1,2*}, 张鹏宇^{1,2}, 雷江^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:在岩土工程勘察中,通过钻探获取高质量的原状土样至关重要,其核心在于最大程度减少对样品的扰动。本文针对钻进取样过程中钻井液对土样的侵蚀扰动问题,基于取心钻头孔底模型,采用Fluent软件进行了数值模拟研究。研究表明,钻井液对土样的侵蚀随时间呈阶梯式扩散,其范围自样品上部向底部逐步扩展,并可划分为三个典型侵蚀区域。在不同钻井液黏度和流速条件下,样品上部与底部的侵蚀程度均明显大于中部。具体而言,上部侵蚀范围随黏度和流速的增大而向中部扩展;而底部侵蚀范围随流速增大而增大,却随黏度增大而减小。总体来看,土样渗透率的增大、钻井液黏度的降低以及流速的提高,均会显著增强侵蚀作用,且侵蚀在样品底部最为剧烈。本研究揭示了钻井液与土体相互作用的多参数耦合侵蚀机制,为优化钻井液性能和钻进工艺提供了定量依据,对提升原状土取样质量与工程勘察数据的可靠性具有重要意义。

关键词:浅层钻探取样;土体样品;数值模拟;侵蚀扰动;钻井液;黏度;渗透率

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)06-0034-08

Numerical simulation and parameter influence analysis of drilling fluid erosion on samples

NIE Kaiwen^{1,2}, QU Lili^{1,2}, WANG Yuan^{1,2*}, ZHANG Pengyu^{1,2}, LEI Jiang^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: In geotechnical engineering investigations, obtaining high-quality undisturbed soil samples through drilling is crucial, with the core objective being to minimize sample disturbance. This study addresses the issue of drilling fluid erosion and disturbance on soil samples during the drilling and sampling process. Based on a bottom-hole model of a core bit, numerical simulations were conducted using Fluent software. The research reveals that the erosion of soil samples by drilling fluid advances in a stepwise manner over time, extending from the upper part of the sample toward the bottom, and can be divided into three typical erosion zones. Under varying drilling fluid viscosities and flow rates, the degree of erosion at both the upper and bottom parts of the sample is significantly greater than that in the middle section. Specifically, the erosion range at the upper part expands toward the middle as viscosity and flow rate increase, while the erosion range at the bottom increases with higher flow rates but decreases with higher viscosity. Overall, an increase in soil sample permeability, a reduction in drilling fluid viscosity, and an elevation in flow rate all significantly enhance the erosion effect, with the most severe erosion occurring at the bottom of the sample. This study elucidates the multi-parameter coupled erosion mechanism of the interaction between drilling fluid and soil, providing a quantitative basis for optimizing drilling fluid properties and drilling techniques, which is of great significance for

收稿日期:2025-05-17; 修回日期:2025-06-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.06.004

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目“冰下湖随钻孔内超前探测与湖底沉积物保真取样技术”(编号:2024YFC2813700);吉林省自然科学基金项目“含挥发性污染物土体高保真采样技术及设备”(编号:YDZJ202401331ZYTS)

第一作者:聂开文,男,汉族,2000年生,硕士研究生,资源与环境专业,研究方向为复杂环境保真取样技术,吉林省长春市西民主大街938号, nkkkw125@163.com。

通信作者:王元,男,汉族,1988年生,副教授,地质工程专业,博士,主要从事天然气水合物高效钻采技术及油页岩原位转化开采技术相关研究工作,吉林省长春市西民主大街938号, wy20119@jlu.edu.cn。

引用格式:聂开文,曲莉莉,王元,等. 钻井液侵蚀样品的数值模拟与参数影响分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 34-41.

NIE Kaiwen, QU Lili, WANG Yuan, et al. Numerical simulation and parameter influence analysis of drilling fluid erosion on samples [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 34-41.

improving the quality of undisturbed soil sampling and the reliability of engineering investigation data.

Key words: shallow drilling sampling; soil sample; numerical simulation; erosion and disturbance; drilling fluid; viscosity; permeability

0 引言

随着我国经济与工业化进程的快速发展,岩土环境问题日益凸显,其中地表浅层土体的污染尤为严重^[1]。土体污染不仅会破坏其自身的物理化学特性,更会通过地下水、农作物等途径,最终威胁到人类健康。在此背景下,随着“十三五”国土规划的实施及地质环境调查项目的推进,对岩土环境的取样调查需求也日益增多^[2]。因此,为响应新时代生态文明建设方针、服务民生,系统性开展浅层土体取样调查工作,已成为一项紧迫而重要的任务。

获取浅层土样最有效的方法是进行浅层钻探取样^[3],其深度通常在100 m以内^[4]。为确保土样的保真性,取样过程必须最大程度地减少对土体的扰动,这是保证后续定量定性分析准确性的前提。目前浅层土体的取样方法主要有压入式、贯入式和旋转式等^[5],对于较深层土体,通常采用回转钻进取样^[2],在钻进过程中需要使用钻井液。然而,钻井液在发挥携带岩屑、冷却钻头的关键作用的同时,与土体的相互作用也带来了新的挑战。在非均质土石混合地层或有机污染物地层等复杂条件下,钻井液的物理化学性质极易改变土体的原始组分与微观结构,导致样品污染和结构破坏,即二次污染^[6-7]。如何有效抑制并减少钻井液对土样的二次污染,已成为提升浅层取样质量、保障调查数据可靠性的关键技术瓶颈。

进入21世纪后,随着计算机技术和计算流体力学(CFD)的飞速发展,数值模拟已成为分析钻头孔底流场的重要手段。国内外学者已广泛运用CFD技术,通过优化钻头的水力参数(如流量、喷嘴尺寸)与结构参数(如角度、齿形),显著提升了钻探效率与安全性^[8-16]。但是由于工程环境、钻头结构和钻进工艺参数的多样性,目前对取心钻头孔底流场仍缺乏系统性的认识与普适性描述^[17]。更为关键的是,现有研究大多聚焦于提升钻进效率本身,而对于流场与岩心的耦合作用,特别是钻井液对岩心(土样)的扰动机制及其对取样质量的影响,关注尚显不足。

在实际工程中,钻井液不仅需要满足流动性能要求,其与土体的相互作用还会改变地层特性。已

有研究表明,有机污染物能通过改变土体的微观结构与孔隙特征,进而影响钻井液的渗透与封堵效果^[7]。在土体参数预测方面,最新的机器学习模型已能基于钻井参数进行土力学性质实时预测,但未充分考虑钻井液侵入对土体参数的影响^[18]。同样,非均质地层的颗粒流模型虽揭示了土石混合体的宏观力学行为,却同样缺乏对钻井液-土体耦合效应的深入分析^[19]。

本文旨在揭示钻进参数与土体性质对钻井液扰动效应的影响规律。为此,本文采用计算流体动力学方法,利用Fluent软件对取心钻头孔底流场进行数值模拟,通过分析钻井液在孔底的流动过程,量化其对土样的扰动程度,并揭示不同钻进参数和地层条件下的扰动机制。本研究成果期望能为优化取心钻头的水力参数与结构设计提供理论依据,最终达到减少土样扰动、提高取样质量的目标^[17]。

1 模型建立

1.1 几何模型

使用SolidWorks软件创建取心钻头的几何模型,如图1所示,钻头胎体外径60 mm,内径42 mm,钢体外径55 mm,内径45 mm,钻头高40 mm,4个水口,水口高5 mm、宽5 mm。图1(b)中蓝色区域为钻井液流体域,棕色实体为土体样品,白色实体为取心钻头。

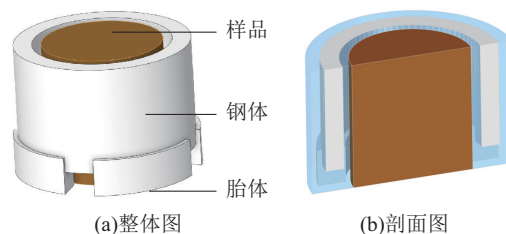


图1 钻头3D模型

Fig.1 Drill bit 3D model

钻头模型为对称结构,为简化模拟,选取两水口之间的剖面作为仿真模型对象,坐标原点选取在土样底部中心位置,作为研究钻井液对土样侵蚀扰动影响的几何模型。钻井液从入口流入,流经土样

外表面和钻头内表面之间的间隙,通过水口进入环状间隙上返^[20],从出口流出。

1.2 网格无关性验证

对仿真模型进行网格划分,对边界区域进行细化,网格数量依次为4000、8000、12000、16000、20000。对流域内压力进行分析,实现无关性验证,模拟结果如图2所示。可以看出,当网格超过12000时模拟的结果趋近一致。为了保证模拟结果可靠性的同时减少模拟时间,网格数量选择为12000。

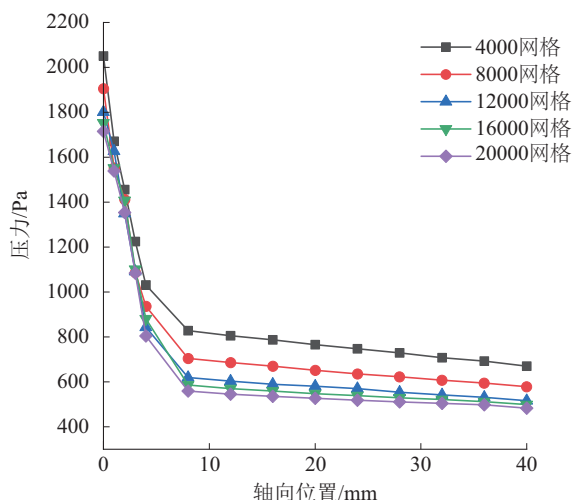


图2 不同轴向位置钻井液压力情况

Fig.2 Drilling fluid pressure conditions at different axial positions

1.3 求解设置

钻进过程中钻井液会渗透到土样之中,为了模拟钻井液对土样的侵蚀效果,假设土样为各向同性,各位置渗透率相同,孔隙分布均匀,将样品设置为多孔介质,使其成为流体域的一部分^[21]。同时为观察钻井液在样品内部的流动状态,仿真模型选择多相流模型,并假设初始状态模型中只有空气相,钻井液与空气相的界面张力在宏观流动尺度影响较小,尤其在湍流主导的条件下,表面张力可忽略。由于钻井液密度远高于空气,相间滑动速度较小,计算相间阻力时采用均相阻力假设,并用Schiller-Naumann曳力模型。钻井液在孔底流动过程中,遵循质量守恒方程、动量守恒方程(即N-S方程)和能量守恒方程^[22-23]。钻井液在孔底流动状态复杂,雷诺数可由式(1)计算^[24],当雷诺数大于4000时其流动状态为湍流^[25],通过计算本文模型钻井液流动符

合湍流模型,故选用 $k-\epsilon$ 湍流模型进行计算模拟,其在湍流场具有较高的适用性,更符合实际工况^[26]。

$$Re = \rho u D_e / \mu \quad (1)$$

$$D_e = 4ND / (3N + 1) \quad (2)$$

式中: Re ——雷诺数; ρ ——流体密度; u ——流体平均流速; D_e ——有效内径; μ ——流体动力黏度; N ——流性指数; D ——环状通道内径。

模型入口边界条件设置为速度入口,出口设置为压力出口,模拟不考虑流场与样品的热交换,边界壁面设置为绝热壁面,计算方式选择瞬态模拟,可模拟出钻井液侵蚀土样随时间的变化情况,模拟时间设置为2 s,假设钻井液2 s之后达到稳定状态。

2 仿真计算及结果讨论

以下模拟将通过改变钻井液黏度、土样渗透率和孔隙度等因素来研究钻井液对样品的扰动规律。

2.1 样品渗透率对钻井液侵蚀样品的影响

土样被视为多孔介质,用渗透率描述其允许流体通过的能力,钻井液在其中的流动看作渗流^[27],由达西定律可知,土体渗透率直接影响流体在土体中的流动行为,如流动速度、轨迹和分布等^[28]。

$$k = \frac{n^3}{CS^2} = \frac{n^3}{CS_0^2(1-n)^2} \quad (3)$$

式中: k ——渗透率; n ——介质孔隙度; C ——Kozeny-Carman常数; S ——比表面积; S_0 ——单位体积颗粒的表面积。

Nazaroff^[29]根据土壤类型将土壤分为4个等级,如表1所示。依据土壤分级,选取渗透率分别为 1×10^{-11} 、 1×10^{-10} 、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 的Ⅱ级土壤作为研究对象,研究不同渗透率条件下钻井液对样品的侵蚀情况。

表1 土壤分级

Table 1 Soil Classification

土壤等级	土壤类型	渗透率/ m^2
I	纯净砂土	$10^{-7} \sim 10^{-9}$
II	砂砾混合物	$10^{-9} \sim 10^{-12}$
III	细砂、粉土、砂-粉-黏土混合物	$10^{-12} \sim 10^{-16}$
IV	均质黏土	$< 10^{-16}$

在Fluent多孔介质模型中,渗透率体现为黏度阻力,黏度阻力为渗透率的倒数。为排除其他因素干扰,三种工况下样品孔隙率均为0.3。样品中的惯

性阻力一般比黏性阻力系数小很多,可以忽略其影响,因此在模拟时只考虑钻井液在样品中的黏性阻

力,惯性阻力设置为0。输出时间为0.5、1、1.5、2 s时的钻井液体积分布云图,见图3。

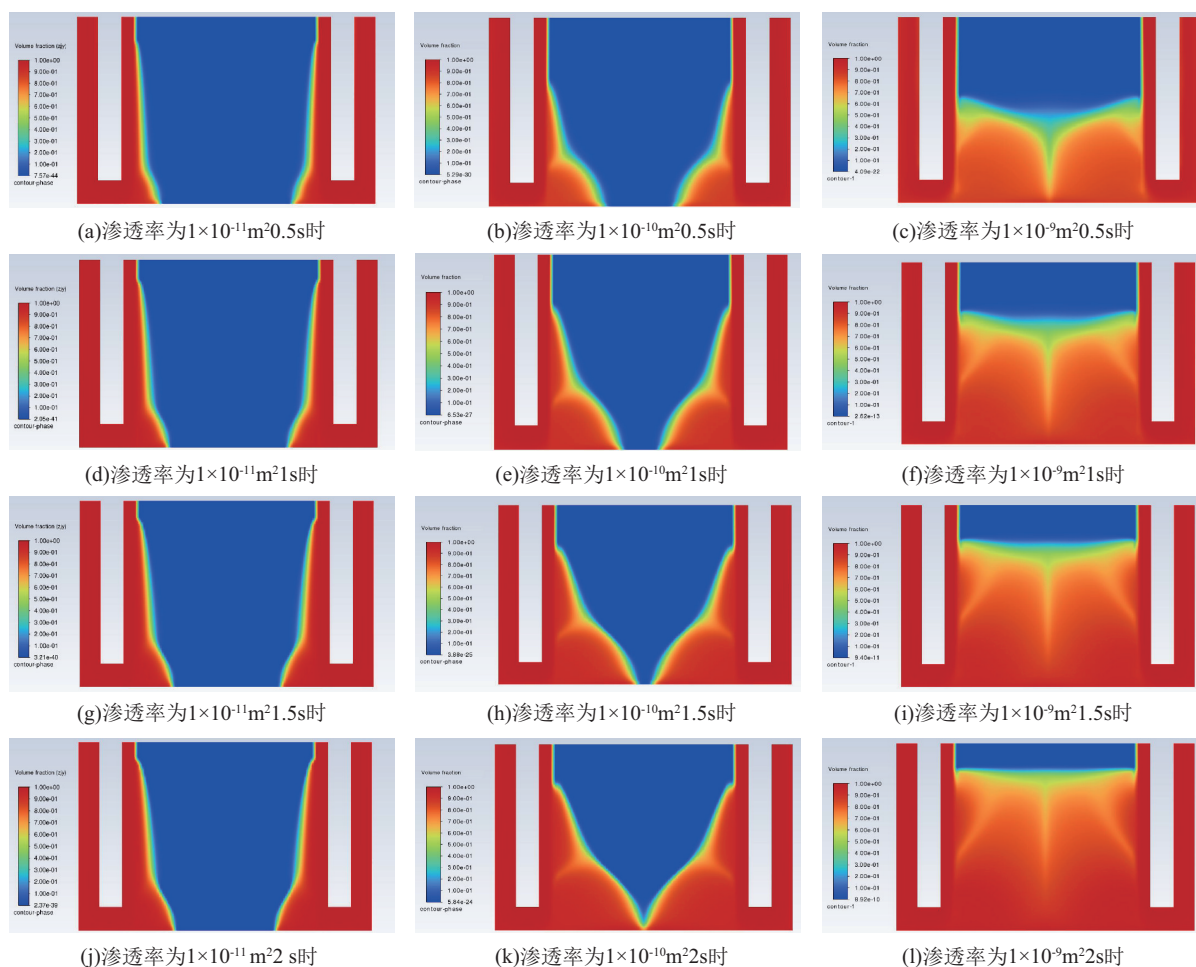


图3 不同时刻不同渗透率下钻井液分布情况

Fig.3 The distribution of drilling fluid at different times and different permeabilities

从图3中可以看出,渗透率相同时,钻井液侵蚀的程度随时间的增加在不断增加,但侵蚀的速率随时间增加而减小。相同的时间段,0~0.5 s内钻井液对样品侵蚀的范围明显大于其他时间段,这是由于在钻井液侵蚀的初期,钻井液的动能最大,随侵入深度的增加需要不断克服样品中的阻力,速度迅速衰减,最后趋近于稳定状态。

钻井液达到孔底位置后,由于流域通道突然改变,垂直流动通道变成水平流动通道,在孔底产生高压区形成对流场,向上逐渐稳定,因此钻井液侵蚀形状呈现出阶梯状分布。在阶梯交界处钻井液侵蚀程度小于两侧,渗透率越大越明显,可大致划分为样品底部、中部和上部三个侵蚀区域,越靠

近样品底部位置对流越激烈,钻井液侵蚀程度越高。

钻井液对不同渗透率样品的侵蚀规律大致相同,样品底部位置侵蚀程度最大,向上依次减小,呈阶梯状;样品的渗透率越大,钻井液在样品中流动所受的阻力越小,能量损耗越少,相同时间内钻井液侵蚀的范围和程度越大。

该模型为对称状,计算得出样品外表面到中心处不同位置的速度曲线,如图4所示,渗透率A、B、C分别为 1×10^{-11} 、 1×10^{-10} 、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 。

从图4看出,在样品底部,不同渗透率下钻井液速度变化规律大致相同,从样品外表面到中心速度不断减小,下降速率也不断减小,最后趋近于稳定;

在样品中部位置,由于样品底部和上部存在压力差,使得钻井液的流动状态不稳定,产生如图5所示的局部对流场,不同渗透率下钻井液速度变化呈现

较大差异;在样品上部,不同渗透率下钻井液速度变化规律也大致相同,先减小后增大,最后逐渐减小趋近稳定。

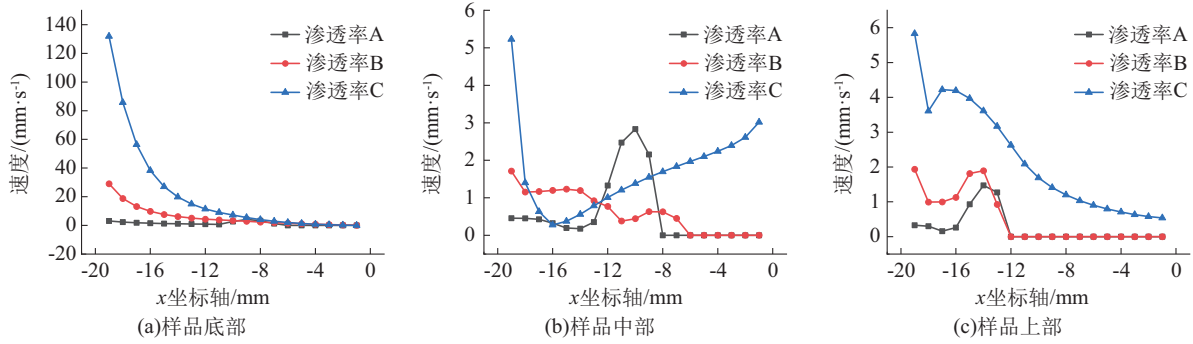


图4 样品不同位置速度曲线

Fig.4 Velocity curve graph for different positions of the sample

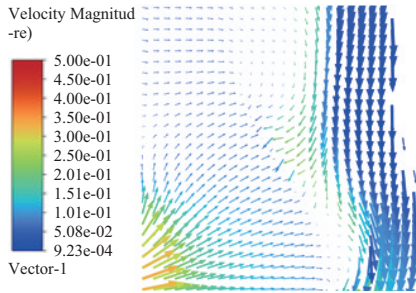


图5 速度矢量图

Fig.5 Velocity vector diagram

2.2 钻井液黏度对样品侵蚀影响

流体黏度是衡量流体抵抗流动或剪切变形的能力,反映流体内部摩擦力的强弱,通过改变土壤的流动阻力、毛细力等影响流体在土壤中的流动行为^[30]。设置不同的钻井液黏度进行模拟求解,分别为1、5、10 mPa·s。为排除其他因素干扰,三次模拟钻井液密度相同,样品渗透率均为 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$,钻井液流速设置为1.5 m/s,不同黏度下模拟的钻井液分布如图6所示。

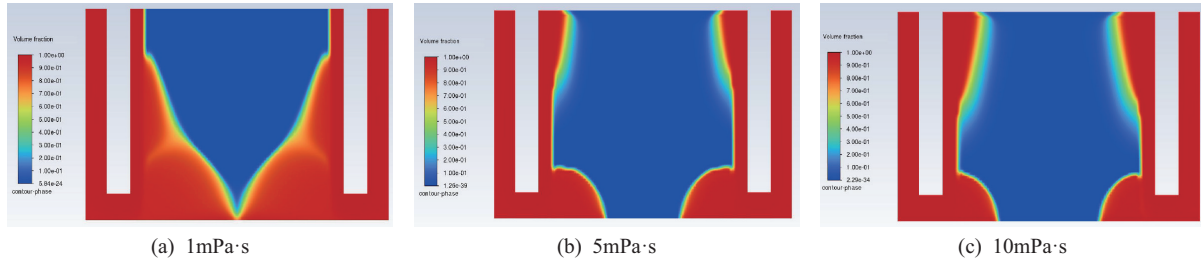


图6 不同黏度下钻井液分布情况

Fig.6 Distribution of drilling fluids with different viscosities

由图6可以看出,不同黏度下,钻井液在样品底部渗透均存在圆弧状的区域,且钻井液黏度越小,圆弧状区域面积越大,主要原因是钻井液黏度增加,对钻井液流动产生阻滞效应,导致流动速率下降,渗流面积减小;而在样品上部区域,渗透区域呈现出三角形,但钻井液黏度越大,渗透面积越大,与岩心底部相反。这是由于钻井液在流动过程中产生了黏性指进效应^[31],本质是两种不相容流体界面处的Saffman-Taylor不稳定性。其发展过程可以由

黏度比和毛细数控制,当系统满足式(6)时,界面失稳并形成指进结构。

黏度比:

$$m = \mu_2 / \mu_1 \quad (4)$$

毛细数:

$$C_a = \mu_1 U / \gamma \quad (5)$$

$$C_a > C_{a,c} \propto 1/m \quad (6)$$

式中: m ——黏度比; μ_2 ——驱替相黏度; μ_1 ——被驱

替相黏度; C_a ——毛细数; U ——特征流速; γ ——界面张力; $C_{a,c}$ ——临界毛细数。

初始状态样品孔隙中为低黏度的空气相,当高黏度的钻井液推动低黏度的空气时,空气流动性更强,形成指状流动通道,高黏度的钻井液能够绕过阻力大的区域,导致渗流区域变大。

2.3 钻井液流速对样品侵蚀影响

钻井液流速变化会显著影响其在样品中的流

动状态和特征,从而影响流体对样品的侵蚀作用。以钻井液流速分别为1.5、2.5、3.5 m/s进行模拟,渗透率均为 $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$,其余参数一致。其中3.5 m/s的峰值流速基于极端工况下的钻井液流动特性设置,用于分析短时间内的极端工况下钻井液对样品的侵蚀情况,更全面地揭示流速变化对样品侵蚀的影响规律。钻井液分布如图7所示。

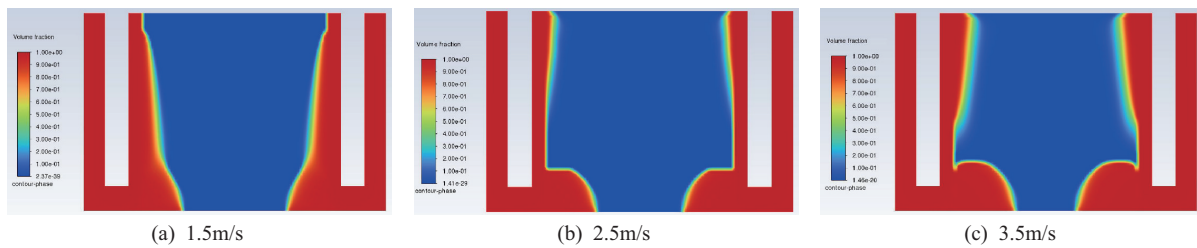


图7 不同流速下钻井液分布情况

Fig.7 Distribution of drilling fluid at different flow rates

从图7中可以看出,在不同流速下,样品底部和上部最先受到侵蚀,逐渐向样品中部扩展,且随钻井液速度升高,样品不同部位侵蚀范围逐渐增加。这是由于钻井液流入速度较低时,样品中低速度区域占比大,钻井液为达西流,流动遵循达西定律,处于层流状态^[32],对样品的侵蚀冲刷作用较小;流入速度较大时,出现Forchheimer效应,在高速渗流时出现非线性流动现象,其本质是钻井液流体惯性力与黏性力的竞争导致达西定律失效,这种流动状态的改变可以由Forchheimer方程描述^[33]。

$$-\nabla P = \frac{150(1-\phi)^2\mu}{\phi^3 d_p^2} Q + \frac{1.75(1-\phi)\rho}{\phi^3 d_p} Q^2 \quad (7)$$

式中: ϕ ——孔隙率; d_p ——颗粒直径; Q ——体积流量。

式(7)中等号右方第一项为线性项,代表黏性力主导的达西流,第二项为非线性项,代表惯性力主导的非达西流。流动状态的转变可以通过Forchheimer系数判断,当 $F_o > 0.1$ 时惯性效应不可忽略。

$$F_o = \frac{1.75\rho^2 u^2 d_p^2}{150(1-\phi)\mu^2 d_p} \quad (8)$$

由于速度增加,样品中高速区域占比增大,惯性增强,样品中孔隙通道弯曲导致动能损失,流动由惯性主导,此时钻井液为非达西流,在样品中出

现涡流和对流场,改变土体样品的孔隙结构。绘制不同高度样品压力曲线,如图8所示,可以看出随钻井液速度增加,样品内压力逐渐增大,在样品底部压力最为集中,样品中部以上位置压力迅速减小,当样品中产生压力梯度时,压力差会导致钻井液从高压区向低压区流动^[34]。钻井液速度为3.5 m/s时,可以明显看出样品中部到上部压力不断增加,这与图7中样品底部和上部位置钻井液侵蚀范围大于中部现象一致。

3 结论

本文基于计算流体动力学理论,利用数值模拟

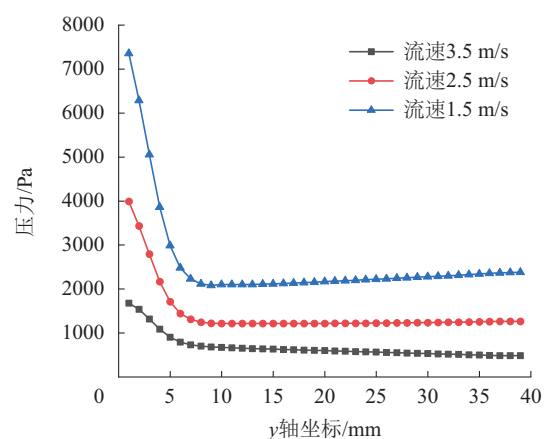


图8 不同高度样品压力曲线

Fig.8 Pressure curves of samples at different heights

软件,通过改变土体样品渗透率、钻井液黏度和钻井液流入速度,以取心钻头孔底简化模型为对象进行数值模拟,得到以上参数在钻井取样过程中对钻井液侵蚀扰动样品的影响规律。仿真结果表明,钻井液对样品侵蚀程度随样品渗透率增大、钻井液黏度减小、流入速度增加而增加,总体规律是越靠近样品底部侵蚀范围越大,但也存在一定差异。

(1)渗透率的增加,导致钻井液在样品中流动阻力减小,使得钻井液侵蚀程度随样品渗透率增加而增加,钻井液侵蚀样品随时间呈阶梯状扩散。

(2)随钻井液黏度增加,其内摩擦增加,流动受阻,使得样品底部侵蚀减小,但由于钻井液在样品上部产生黏性指进效应,导致样品上部侵蚀增加并向中部扩展。

(3)随钻井液流速增加,钻井液动能增加,流动由惯性主导,使得钻井液在样品底部和上部侵蚀均增加,中部侵蚀程度最小。

以上结论说明,不同的钻进参数和岩土体参数均会影响钻井液侵蚀样品的程度,在实际取样过程中,应根据对样品的要求,针对不同的岩土体,选择合适的钻井液参数和钻进参数,以减小钻井液对土体样品的侵蚀。

本研究揭示了钻井液与土样相互作用的多因素耦合机制,为高质量原状土取样提供了参数调控依据,为复杂地层中的保真取样技术提供理论支撑。需要指出的是,本研究基于土体各向同性假设,低估了实际非均质地层中钻井液沿优势通道的优先流动效应。同时,未考虑颗粒迁移、孔隙结构动态变化及流固耦合变形对侵蚀过程的反馈作用。此外,在高流速工况下忽略惯性阻力项可能导致渗流模型精度不足。未来研究可通过结合非均质多孔介质模型、引入Forchheimer方程或耦合动态界面参数进一步提升模拟的真实性与工程适用性,为钻探取样技术的精细化与智能化发展提供更坚实的理论基础。

参考文献(References):

- [1] 张芹,张启航,张煜东,等.污染土的研究现状及其治理[J].土工基础,2015,29(6):83-85.
ZHANG Qin, ZHANG Qihang, ZHANG Yudong, et al. The state-of-the-art of studies on contaminated soils[J]. Soil Engineering and Foundation, 2015, 29(6): 83-85.
- [2] 冉灵杰.浅层土壤环境取样钻进技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [3] 卢猛,何远信,宋殿兰,等.草原浅覆盖区浅钻取样技术的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):1-6.
LU Meng, HE Yuanxin, SONG Dianlan, et al. Research and application of shallow sampling technology in shallow overburden area of grassland[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(11): 1-6.
- [4] 杨汉水,苏兴涛,卢猛.轻便浅层取样机具在大兴安岭森林植被覆盖区化探样品采集中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):81-84.
YANG Hanshui, SU Xingtao, LU Meng. Application study on portable shallow sampling machine in geochemical sample collection work in forest vegetation coverage area in Daxing' Anling[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(8): 81-84.
- [5] ASTM. Standard guide for selection of subsurface soil and rock sampling devices for environmental and geotechnical investigations: ASTM D6169/D6169M-21[S]. West Conshohocken: ASTM, 2021.
- [6] 曹龙龙,张恒春,王稳石,等.密闭取心钻头两相流流场CFD模拟研究[J].钻探工程,2021,48(11):35-41.
CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. CFD simulation of the two phase flow field in the sealed coring bit[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 35-41.
- [7] 邓盈盈,孙平贺,曹函,等.直推钻进钻遇有机污染地层微观特征试验研究[J].钻探工程,2024,51(3):27-36.
DENG Yingying, SUN Pinghe, CAO Han, et al. Experimental study on microcosmic characteristics of organic polluted formations encountered by direct push drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 27-36.
- [8] 朱海燕,王锡洲,刘时英,等.PDC钻头水力学研究最新进展[J].石油钻采工艺,2009,31(5):23-28.
ZHU Haiyan, WANG Xizhou, LIU Shiyang, et al. The latest developments of the hydraulics research on PDC bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5): 23-28.
- [9] Watson G R, Barton N A, Hargrave G K. Using new computational fluid dynamics techniques to improve PDC-bit performance[J]. Journal of Petroleum Technology, 1997, 49(2): 154-155.
- [10] 管志川,陈庭根,蔡镜仑.用矩形出口喷嘴改善PDC钻头水力结构的研究[J].石油大学学报(自然科学版),1992(2):20-28.
GUAN Zhichuan, CHEN Tinggen, CAI Jinglun. Experimental study on improving pdc bit hydraulics by using rectangular nozzles[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1992(2): 20-28.
- [11] 高振果,董杰.PDC钻头井底水力问题的计算机模拟[J].石油钻采工艺,1995(6):19-24,104-105.
GAO Zhengguo, DONG Jie. Computer simulating hydraulics of pdc bit on bottom of hole[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995(6): 19-24, 104-105.
- [12] 杨义,秦超,况雨春.PDC钻头静态及旋转流场数值模拟比较研究[J].钻采工艺,2015,38(2):82-85.

- YANG Yi, QIN Chao, KUANG Yuchun. Comparative study on static and rotating flow fields of PDC drill bits[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(2): 82-85.
- [13] 吴泽兵, 王勇勇, 潘玉杰, 等. PDC钻头旋转流场与非旋转流场的模拟对比研究[J]. *石油矿场机械*, 2020, 49(1): 10-15.
- WU Zebing, WANG Yongyong, PAN Yujie, et al. Comparative study on simulation of rotating flow field and non-rotating flow field of PDC bit[J]. *Oil Field Equipment*, 2020, 49(1): 10-15.
- [14] 屈朋举, 但斌斌, 陈刚, 等. PDC钻头设计参数对井底流场分布的影响规律研究[J]. *机床与液压*, 2023, 51(13): 160-165.
- QU Pengju, DAN Binbin, CHEN Gang, et al. Influence of PDC bit design parameters on bottomhole flow field distribution[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(13): 160-165.
- [15] 吴金生. 取心钻头孔底流场仿真与优化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- WU Jinsheng. Simulation and optimization research of hole bottom flow field of coring bits[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [16] 潘晓毅, 秦建新, 谢德龙, 等. 金刚石钻头井底流场CFD模拟研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2016, 36(4): 34-38.
- PAN Xiaoyi, QIN Jianxin, XIE Delong, et al. CFD simulation of diamond bit's bottomhole flow field[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2016, 36(4): 34-38.
- [17] 刘宝昌, 曹鑫, 计胜利, 等. 孔底流场和温度场数值模拟与试验研究——以取心孕镶金刚石钻头为例[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(5): 33-38.
- LIU Baochang, CAO Xin, JI Shengli, et al. Simulation and experimental research on flow field and temperature field of diamond impregnated drill bit[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018, 38(5): 33-38.
- [18] 李谦, 周治刚, 邓光宏, 等. 基于钻进参数实时预测土体力学性质的Stacking集成模型[J]. *钻探工程*, 2024, 51(S1): 61-69.
- LI Qian, ZHOU Zhigang, DENG Guanghong, et al. Stacking integrated model for real-time prediction of soil mechanical properties based on drilling parameters[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1): 61-69.
- [19] 夏余宏焯, 孙平贺, 伍新民, 等. 基于非均质地层参数表征的颗粒流模型构建[J]. *钻探工程*, 2021, 48(S1): 52-60.
- XIA Yuhongye, SUN Pinghe, WU Xinmin, et al. Construction of a particle flow model based on the characterization of heterogeneous formation parameters[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(S1): 52-60.
- [20] 蒋国盛, 汤凤林. 摩擦生热热力钻头(TM)结构参数与钻进规程参数关系的分析研究[J]. *国外地质勘探技术*, 1998(3): 29-31.
- JIANG Guosheng, TANG Fenglin. Analysis and research on the relationship between structural parameters of thermal drilling bit(TM) and drilling procedure parameters[J]. *Foreign Geoexploration Technology*, 1998(3): 29-31.
- [21] 刘晓赫. 埋地管道泄漏天然气在土壤中的扩散规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- LIU Xiaohe. Study on dispersion characteristics of leaked natural gas from buried pipelines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [22] Fomin S, Hashida T, Chugunov V, et al. A borehole temperature during drilling in a fractured rock formation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(2): 385-394.
- [23] Liu Y, Wei J P, Ren T, et al. Experimental study of flow field structure of interrupted pulsed water jet and breakage of hard rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 78: 253-261.
- [24] 刘乃鹏. 钻井液流变性的在线检测及智能寻优[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
- LIU Naipeng. Online measurement and intelligent optimization of drilling fluid rheological properties[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [25] 杨彩凤. 水基钻井液水平管泡状流流变特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- YANG Caifeng. The study on rheological property of horizontal bubbly flow of water-based drilling fluid[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018.
- [26] 李苓豪. RCH-320型反循环空气锤分流引射装置设计及性能仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- LI Linghao. Design and performance simulation analysis of the diversion and ejection device for the RCH-320 reverse circulation air hammer[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [27] 孟雅. 高煤阶煤中气体扩散渗流机制及煤层气井产能评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- MENG Ya. Mechanism of gas diffusion-seepage in high-rank coal and productivity evaluation of coalbed methane wells[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018.
- [28] Shi B, Murakami Y, Wu Z S. Orientation of aggregates of fine-grained soil: quantification and application[J]. *Engineering Geology*, 1998, 50(1/2): 59-70.
- [29] Nazaroff W W. Radon transport from soil to air[J]. *Reviews of Geophysics*, 1992, 30(2): 137-160.
- [30] 管小桐. 粘性土的物性特征对其低速渗流的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- GUAN Xiaotong. Study on the influence of physical characteristics of clayey soil on its low-velocity flow[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [31] 王盟浩. 考虑非牛顿性的孔隙尺度两相渗流特征研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- WANG Menghao. Pore-scale investigation of two-phase porous flow characteristics considering non-newtonian properties[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [32] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学[M]. 第3版. 北京: 地质出版社, 2010.
- XUE Yuqun, WU Jichun. *Groundwater Dynamics* [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [33] Ruth D, Ma H P. On the derivation of the forchheimer equation by means of the averaging theorem[J]. *Transport in Porous Media*, 1992, 7(3): 255-264.
- [34] 李想. 埋地含硫天然气管道泄漏-渗流-扩散规律及潜在影响区域研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2022.
- LI Xiang. Leakage-seepage-diffusion law and potential impact area of buried sour natural gas pipelines[D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2022.